

## بررسی اثر پارامترهای مختلف در یک الگوی بارگذاری ثابت برای در نظر گرفتن اثر موده‌های بالا در تحلیل پوش‌آور ساختمان‌های بلند

محمد امین امینی

دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران  
ma\_amini@sut.ac.ir

مهدی پورشاء

استادیار سازه، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران  
poursha@sut.ac.ir

هیوا پیرصاحب

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

**کلید واژه‌ها:** الگوی بارگذاری ارتقا یافته، ضریب مشارکت مودی، نسبت مشارکت جرم موثر مودی، شبه شتاب طیفی، اثر موده‌های بالا، ساختمان‌های بلند.

### چکیده

در این مقاله تلاش می‌شود تا یک الگوی بارگذاری جانبی ارتقا یافته برای در نظر گیری اثر موده‌های بالا در تحلیل پوش‌آور ساختمان‌های بلند ارائه شود. مزیت بزرگ این روش آن است که اثر موده‌های بالا در یک الگوی بارگذاری ثابت متمرکز می‌شود. بنابراین در این روش، تنها یک تحلیل پوش‌آور انجام می‌شود و نیازی به استفاده از قواعد ترکیب مودی برای ترکیب پاسخ‌های سازه نمی‌باشد. بدین منظور با در نظر گرفتن متغیرهایی چون ضریب مشارکت مودی، نسبت مشارکت جرم موثر مودی و شبه شتاب طیفی زلزله، چهار الگوی بارگذاری مختلف معرفی می‌شود. این الگوهای بارگذاری از جمع جبری نیروهای جانبی مودی حاصل می‌شوند. برای ارزیابی این الگوهای بارگذاری، دو قاب خمشی فولادی ویژه ۱۰ و ۱۵ طبقه انتخاب و نیازهای لرزه‌ای حاصل از تحلیل‌های پوش‌آور با استفاده از این الگوها با متوسط نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی مقایسه می‌شوند. علاوه بر این، یک تحلیل پوش‌آور متداول با استفاده از الگوی بارگذاری مثلثی برای هر قاب انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که استفاده همزمان از نسبت مشارکت جرم موثر مودی و شبه شتاب طیفی زلزله در الگوی بارگذاری جانبی منجر به تخمین دقیق نیازهای لرزه‌ای در طبقات بالای ساختمان‌های بلند می‌گردد.

### مقدمه

تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی یک روش دقیق برای تخمین نیازهای لرزه‌ای سازه‌ها در محدوده غیرارتجاعی می‌باشد. با وجود این، به دلیل پیچیدگی‌های عددی و حجم محاسبات زیاد در این روش، استفاده از روش‌های ساده به طور فزاینده رو به گسترش می‌باشد. در کاربردهای مهندسی، روش استاتیکی غیرخطی یا تحلیل پوش‌آور به عنوان یک ابزار مناسب برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. تحلیل‌های پوش‌آور متداول که در دستورالعمل و آیین‌نامه‌های مختلف (FEMA 356; Eurocode-8; ATC-40) ارائه شده‌اند، به سازه‌هایی محدود می‌شوند که مود اول در پاسخ آنها غالب می‌باشد. در این روش‌ها، سازه تحت نیروهای جانبی فزاینده با یک الگوی بار ثابت تا رسیدن به یک تغییر مکان هدف مشخص قرار می‌گیرد. دو محدودیت مهم در تحلیل‌های پوش‌آور متداول وجود دارد: (۱) این روش‌ها نمی‌توانند اثر موده‌های ارتعاشی بالا در پاسخ سازه را در نظر بگیرند (Krawinkler and Seneviratna 1998; Chopra and Goel 2002)؛ (۲) از تغییرات در مشخصات دینامیکی سازه که می‌تواند منجر به یک الگوی بار متغیر شود، صرف نظر می‌گردد (Gupta and Kunnath 2000).

از بیش از یک دهه گذشته، محققین (Chopra and Goel 2002, 2004, and 2005; Chopra et al. 2004; Jan et al. 2004; Kim and Kurama 2008; Poursha et al. 2009, 2010; Sucuoglu and Gunay 2011; Kreslin and Fajfar 2011; Panyakapo 2014)



برای در نظر گرفتن اثر مودهای ارتعاشی بالا در پاسخ‌های لرزه‌ای، تحلیل‌های پوش‌اور ارتقا یافته را توسعه داده‌اند. Chopra and Goel (2002) براساس مفاهیم دینامیک سازه تحلیل پوش‌اور مودی<sup>1</sup> (MPA) را پیشنهاد دادند. در این روش، برای انجام تحلیل پوش‌اور در هر مود از یک الگوی بار جانبی ثابت مودی استفاده می‌شود. سپس، نتایج حاصل از هر مود با استفاده از یک قاعده ترکیب مودی مناسب با یکدیگر ترکیب می‌شوند. در این روش، برخی از محدودیت‌ها وجود دارد؛ به عنوان مثال، دوران مفاصل پلاستیک در طبقات بالا در ساختمان‌های بلند به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر تخمین زده می‌شود (Chopra and Goel 2002; Poursha et al. 2009, and 2010). همچنین، احتمال برگشت منحنی پوش‌اور در مودهای ارتعاشی بالاتر وجود دارد (Chopra and Goel 2005). پس از آن، نسخه اصلاح شده تحلیل پوش‌اور مودی<sup>2</sup> (MMPA) توسط Chopra et al. (2004) پیشنهاد شد که در آن مشارکت مودهای ارتعاشی بالا در پاسخ سازه با فرض رفتار ارتجاعی ساختمان محاسبه می‌شود.

در پژوهش دیگری، (Jan et al. (2004) تحلیل پوش‌اور حد بالا را توسعه دادند. در این روش، الگوی بار جانبی ثابت با استفاده از یک رابطه جدید با بکارگیری قاعده ترکیب مودی جمع قدر مطلق تعیین می‌شود. Poursha et al. (2009) برای در نظر گرفتن اثر مودهای بالا، تحلیل پوش‌اور مودی متوالی<sup>3</sup> (CMP) را پیشنهاد دادند. این روش، از تحلیل‌های پوش‌اور تک و چند مرحله‌ای تشکیل می‌شود. پاسخ‌های نهایی سازه از پوش‌اور نتایج حاصل از تحلیل‌های تک و چند مرحله‌ای بدست می‌آیند. Kreslin and Fajfar (2011) روش N2 را برای لحاظ کردن اثر مودهای بالا توسعه دادند. در این روش فرض می‌شود که سازه در مودهای ارتعاشی بالا در محدوده ارتجاعی باقی می‌ماند. پاسخ‌های لرزه‌ای از پوش‌اور نتایج یک تحلیل پوش‌اور و یک تحلیل مودال ارتجاعی حاصل می‌شوند.

هدف از این مقاله، پیشنهاد یک الگوی بار جانبی ارتقا یافته برای در نظر گرفتن اثر مودهای بالا در تحلیل‌های پوش‌اور می‌باشد. مزیت عمده این روش آن است که اثر مودهای بالا در یک توزیع نیروی جانبی ثابت متمرکز می‌شود. بنابراین، انجام فقط یک تحلیل پوش‌اور کافی خواهد بود و نیازی به استفاده از قواعد ترکیب مودی برای ترکیب پاسخ‌ها نمی‌باشد. برای یافتن بهترین الگوی بار جانبی، اثر متغیرهای مختلف از قبیل ضریب مشارکت مودی، نسبت مشارکت جرم موثر مودی و شبه شتاب طیفی زلزله بر توزیع نیروی جانبی بررسی می‌شود. بدین منظور، پس از انتخاب دو قاب خمشی فولادی ۱۰ و ۱۵ طبقه، نیازهای لرزه‌ای حاصل از تحلیل‌های پوش‌اور با الگوهای مختلف بارگذاری با نتایج تحلیل‌های تاریخیچه زمانی غیرخطی به عنوان پاسخ دقیق مقایسه می‌شوند.

## اصول تحلیل مودی ارتجاعی

معادله حاکم بر حرکت یک سیستم چند درجه آزادی (MDOF) تحت مولفه افقی حرکت زمین بصورت زیر است (Chopra 2001):

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

که  $m$  و  $c$  و  $k$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه می‌باشند و  $\ddot{u}_g$  بردار یکه است. طرف راست رابطه (۱) نشان دهنده نیروهای موثر زلزله،  $p_{eff}(t)$  می‌باشد و می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$p_{eff}(t) = -m\ddot{u}_g(t) = -s\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

که  $s$  توزیع نیروهای موثر زلزله در ارتفاع ساختمان می‌باشد و می‌تواند به صورت مجموع نیروهای اینرسی مودی،  $s_n$  توسعه داده شود:

$$s = m\mathbf{i} = \sum_{n=1}^N s_n = \sum_{n=1}^N \Gamma_n m_n \quad (3)$$

در رابطه فوق،  $\Gamma_n$  و  $m_n$  به ترتیب ضریب مشارکت و شکل مود  $n$  ام می‌باشند. جابجایی یک سیستم چند درجه آزادی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{n=1}^N q_n(t) \quad (4)$$

که در رابطه فوق،  $q_n(t)$  مختصه مودی است و معادله حاکم بر آن بصورت زیر می‌باشد:

$$\ddot{q}_n + 2' \Gamma_n \dot{q}_n + \ddot{S}_n q_n = -\Gamma_n \ddot{u}_g(t) \quad (5)$$

<sup>1</sup> Modal Pushover Analysis

<sup>2</sup> Modified Modal Pushover Analysis

<sup>3</sup> Consecutive Modal Pushover Procedure

که  $\ddot{S}_n$  و  $\Gamma_n$  به ترتیب فرکانس طبیعی و نسبت میرایی مود  $n$  ام می‌باشند.  $\Gamma_n$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Gamma_n = \frac{T_n^T \mathbf{m} \mathbf{i}}{T_n^T \mathbf{m}_n} \quad (6)$$

حل معادله (5) بوسیله رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$q_n(t) = \Gamma_n D_n(t) \quad (7)$$

$D_n(t)$  بوسیله معادله حرکت سیستم یک درجه آزادی معادل (SDOF) با مشخصات ارتعاشی مود  $n$  ام سیستم چند درجه آزادی (MDOF) که تحت اثر  $\ddot{u}_g(t)$  قرار گرفته است، تعیین می‌شود:

$$\ddot{D}_n + 2\zeta_n \ddot{S}_n \dot{D}_n + \ddot{S}_n^2 D_n = -\ddot{u}_g(t) \quad (8)$$

جایگزینی رابطه (7) در رابطه (4) جایجایی کفها را بدست می‌دهد:

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{n=1}^N \Gamma_n D_n(t) \quad (9)$$

در اینجا، برخی متغیرها که در ادامه بکار گرفته می‌شوند، معرفی می‌شوند. با استفاده از رابطه (6)، جرم موثر مودی،  $M_n^*$  و نسبت مشارکت جرم موثر مودی برای مود  $n$  ام،  $\Gamma_n$  به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$M_n^* = L_n \Gamma_n \quad (10)$$

$$\Gamma_n = \frac{M_n^*}{M^*} \quad (11)$$

که در روابط فوق:

$$L_n = T_n^T \mathbf{m} \mathbf{i} \quad (12)$$

$$M^* = \sum_{j=1}^N m_j \quad (13)$$

$M^*$  جرم کل ساختمان می‌باشد که از مجموع جرم‌های متمرکز در تراز کف طبقات بدست می‌آید. با استفاده از روابط (3)، (11) و (13) می‌توان نشان داد که مجموع نسبت‌های مشارکت جرم موثر مودی برای همه مودها برابر واحد می‌باشد.

## الگوهای بارگذاری جانبی ارتقا یافته

برای در نظر گرفتن اثر مودهای بالا در تحلیل‌های پوش‌اور، در برخی روش‌های ارتقا یافته مانند تحلیل پوش‌اور مودی (MPA) و تحلیل پوش‌اور مودی اصلاح شده (MMPA) اثر مودهای مختلف بصورت مستقل فرض می‌شود. سپس، پاسخ مودهای مختلف با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا پاسخ کلی سازه بدست آید. در روش دیگری که توسط Poursha et al. (2009) توسعه داده شده است، از تحلیل‌های پوش‌اور تک و چند مرحله‌ای استفاده می‌شود. در تحلیل پوش‌اور چند مرحله‌ای، تحلیل‌های پوش‌اور مودی به صورت متوالی به کار گرفته می‌شوند، به گونه‌ای که هنگامی که یک مرحله (یک تحلیل پوش‌اور مودی) به طور کامل انجام شد، مرحله بعدی (تحلیل پوش‌اور مودی بعدی) با شرایط اولیه‌ای که همان شرایط انتهایی مرحله قبل است، آغاز می‌شود. با وجود این، یک راه نسبتاً ساده‌تر برای غلبه بر محدودیت‌های تحلیل‌های پوش‌اور متداول آن است که اثر مودهای ارتعاشی بالا در قالب یک توزیع نیروی جانبی ثابت در نظر گرفته شود. در این بخش با در نظر گرفتن متغیرهای مختلفی چون



ضریب مشارکت مودی، نسبت مشارکت جرم موثر مودی و شبه شتاب طیفی، چندین الگوی بارگذاری جانبی ارتقا یافته برای انجام تحلیل پوش اور معرفی می شود.

بارگذاری خارجی در معادله دینامیکی حرکت می تواند به صورت تابعی از زمان و تابعی که توزیع مکانی نیروهای موثر زلزله در ارتفاع سازه را نشان می دهد، نوشته شود (رابطه (۲)). علاوه بر این، رابطه (۳) نشان می دهد که توزیع مکانی نیروهای موثر زلزله در ارتفاع ساختمان می تواند به صورت مجموع توزیع نیروهای اینرسی مودی توسعه داده شود. بنابراین، توزیع نیروهای جانبی مودی در یک تحلیل پوش اور می تواند به صورت زیر در نظر گرفته شود:

$$f_n = \Gamma_n m_n \quad (14)$$

در رابطه فوق،  $f_n$  توزیع نیروی جانبی برای مود  $n$  ام می باشد. مناسب ترین راه برای در نظر گرفتن بارگذاری زلزله در یک روند استاتیکی، بکارگیری طیف پاسخ زلزله می باشد. بنابراین با لحاظ کردن اثر بارگذاری خارجی، توزیع نیروهای مودی به صورت زیر خواهد بود:

$$f_n = \Gamma_n m_n S_a(\omega_n, T_n) \quad (15)$$

که در این رابطه،  $S_a$  شبه شتاب طیفی زلزله می باشد که به صورت تابعی از زمان تناوب ارتعاش  $T_n$  و نسبت میرایی  $\omega_n$  برای مود  $n$  ام بیان می شود. ضریب وزنی  $S_a$  برای در نظر گرفتن اثر محتوای فرکانسی زلزله در پاسخ سازه در رابطه (۱۵) وارد شده است. تحقیقات گذشته (Antoniou and Pinho 2004a, b) نشان داده است که لحاظ کردن شتاب طیفی در محاسبه نیروهای جانبی مودی می تواند نتایج تحلیل های پوش اور را بهبود دهد. برخی محققین (Antoniou and Pinho 2004; Matsumori et al. 1999; Kunnath 2004) برای نمایش توزیع نیروهای جانبی مودی از رابطه (۱۵) استفاده کرده اند و سپس با استفاده از یک قاعده ترکیب مودی مناسب آنها را با یکدیگر ترکیب کرده اند. علاوه بر روابط (۱۴) و (۱۵)، در این مقاله، دو توزیع نیروی جانبی مودی جدید پیشنهاد می شود. در این توزیع نیروها، نسبت مشارکت جرم موثر مودی که از رابطه (۱۱) محاسبه می شود، جایگزین ضریب مشارکت مودی در روابط (۱۴) و (۱۵) می گردد. بنابراین، توزیع نیروی جانبی برای مود  $n$  ام می تواند به صورت های زیر نیز نمایش داده شود:

$$f_n = \Gamma_n m_n \quad (16)$$

$$f_n = \Gamma_n m_n S_a(\omega_n, T_n) \quad (17)$$

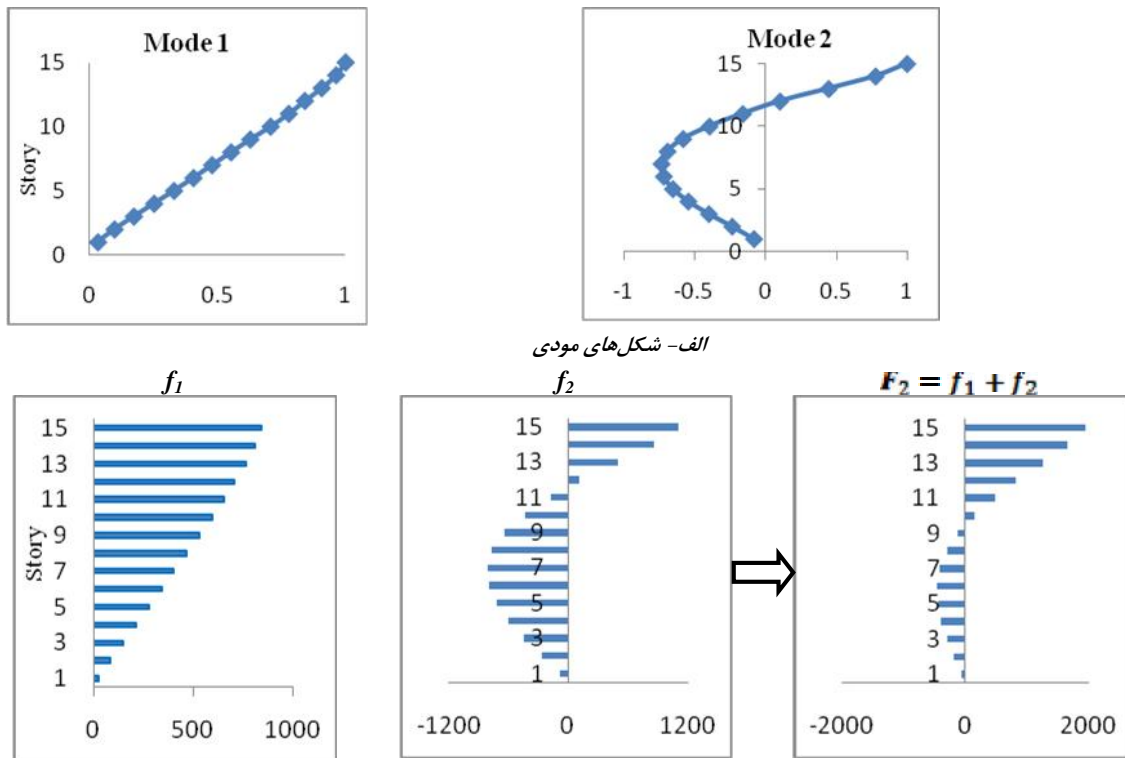
از آنجا که مجموع نسبت های مشارکت جرم موثر مودی برای همه مودها برابر واحد است، انتظار می رود این نسبت بهتر بتواند مشارکت هر مود در توزیع نیروی جانبی را نشان دهد. برای ترکیب نیروهای مودی و محاسبه یک الگوی بارگذاری جانبی ثابت، برخی محققین (Antoniou and Pinho 2004 a; Papanikolaou et al. 2006) از قواعد ترکیب مودی مربعی مانند قاعده SRSS یا CQC استفاده کرده اند. بزرگ ترین محدودیت استفاده از این قواعد، آن است که اثر تغییر علامت نیرو در مودهای بالا در الگوی بار اعمالی منعکس نمی شود. (Antoniou and Pinho 2004 b) برای غلبه بر این محدودیت، یک تحلیل پوش اور بر اساس تغییر مکان را ارائه کردند. از طرف دیگر، برخی از قواعد ترکیب مودی دیگر (Matsumori et al. 1999; Kunnath 2004) نیز برای ترکیب نیروهای مودی مورد استفاده قرار گرفته اند. در این پژوهش، الگوی بارگذاری جانبی ثابت برای انجام تحلیل پوش اور از جمع جبری نیروهای مودی بدست می آید. بنابراین، عبارت زیر برای محاسبه نیروهای جانبی طبقات استفاده می شود:

$$F_k = \sum_{i=1}^k f_i \quad (18)$$

در رابطه فوق  $F_k$  بردار نیروی جانبی است که در تراز کف طبقات اعمال می شود و  $k$  تعداد مودهای ارتعاشی در نظر گرفته شده در محاسبه نیروهای جانبی می باشد. تعداد مودهای ارتعاشی لازم برای محاسبه الگوی بارگذاری جانبی ارتقا یافته به زمان تناوب غالب سازه بستگی دارد و بررسی آن خارج از محدوده این مطالعه می باشد. در این پژوهش، از دو مود اول برای محاسبه الگوی بارگذاری جانبی ارتقا یافته استفاده می شود. بنابراین،  $F_2$  به صورت زیر محاسبه می شود:

$$F_2 = f_1 + f_2 \quad \text{for two mo} \quad (19)$$

از آنجا که مجموع نسبت‌های مشارکت جرم موثر مودی برای همه مودها می‌بایست برابر واحد باشد، در محاسبه  $f_2$  با استفاده از روابط (۱۶) و (۱۷) و جایگذاری در رابطه (۱۹)، بجای  $\Gamma_2$  از  $1 - \Gamma_1$  استفاده می‌شود. شایان توجه است که با محاسبه الگوی بارگذاری جانبی ارتقا یافته به کمک رابطه (۱۸) و انجام یک تحلیل پوش‌آور چند مودی تک اجرایی می‌توان اثر مودهای بالا را در تخمین نیازهای لرزه‌ای ساختمان در نظر گرفت. روند تعیین الگوی بار اعمالی در تحلیل‌های پوش‌آور چند مودی تک اجرایی در شکل ۱ نمایش داده شده است. ابتدا می‌بایست یک تحلیل مقدار ویژه برای تعیین شکل‌های مودی سازه انجام شود (شکل الف). سپس، نیروی مودی طبقات با استفاده از یکی از روابط (۱۴)، (۱۵)، (۱۶) و یا (۱۷) برای هر مود محاسبه می‌شود (شکل ب). سرانجام، به کمک رابطه (۱۸) الگوی بارگذاری جانبی ارتقا یافته برای انجام تحلیل پوش‌آور بدست می‌آید (شکل ب).



شکل ۱: روند تعیین الگوی بار جانبی اعمالی در تحلیل‌های پوش‌آور چند مودی تک اجرایی

## ارزیابی الگوهای بارگذاری ارتقا یافته

در این قسمت، چهار الگوی بارگذاری مختلف که از ترکیب نیروهای مودی با استفاده از رابطه (۱۹) حاصل شده‌است، در تحلیل‌های پوش‌آور به کار گرفته می‌شوند. این الگوهای بارگذاری از ترکیب نیروهای مودی حاصل از روابط (۱۴)، (۱۵)، (۱۶) و (۱۷)، به ترتیب  $S_1$ ،  $S_2$ ،  $S_3$  و  $S_4$  نام‌گذاری می‌شوند. برای بررسی دقت این الگوهای بارگذاری در تخمین نیازهای لرزه‌ای، نتایج تحلیل‌های پوش‌آور با میانگین نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی با بکارگیری رکوردهای مختلف زلزله به عنوان حل دقیق مقایسه می‌شوند. علاوه بر این و به منظور مقایسه بیشتر، برای هر قاب ساختمانی یک تحلیل پوش‌آور متداول با استفاده از الگوی بارگذاری مثلی وارون (TLP) نیز انجام می‌شود. مقدار تغییرمکان هدف در تحلیل‌های پوش‌آور برابر مقدار متوسط بیشینه تغییرمکان بام در تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی در نظر گرفته می‌شود. این مقدار برای قاب‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب برابر  $28/63$  و  $33/58$  سانتیمتر بدست آمده است. برای انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی از روش انتگرال گیری نیومارک با شتاب ثابت استفاده می‌شود. ماتریس میرایی با استفاده از میرایی رایلی با نسبت میرایی  $5/5$  برای مودهای ارتعاشی اول و سوم تعریف می‌شود.

## مدل‌های سازه‌ای

برای ارزیابی الگوهای مختلف بارگذاری در تحلیل‌های پوش‌آور، دو قاب خمشی فولادی ویژه ۱۰ و ۱۵ طبقه از مرجع (Poursha et al. 2009) انتخاب می‌شوند. سازه‌ها دارای سه دهانه می‌باشند و اندازه هر دهانه ۵ متر می‌باشد. ارتفاع همه طبقات نیز  $3/2$  متر می‌باشد. فرض می‌-



شود که ساختمان‌ها روی خاک نوع ۲ آیین‌نامه زلزله ایران (استاندارد ۲۸۰۰) بنا شده‌اند و در منطقه با لرزه‌خیزی بسیار زیاد واقع گردیده‌اند. مشخصات قاب‌های ساختمانی و زمان تناوب ارتعاش ارتجاعی دو مود اول سازه در جدول ۱ نمایش داده شده‌اند.

جدول ۱: مشخصات قاب‌های تحلیلی (Poursha et al. 2009)

ردیف	تعداد طبقات	ارتفاع (m)	عرض (m)	جرم لرزه‌ای کفاها ( $\text{kg s}^2/\text{m}$ )	زمان تناوب مود اول	زمان تناوب مود دوم
۱	۱۰	۳۲	۱۵	۵۴۴۰	۱/۶۹۲	۰/۶۰۴
۲	۱۵	۴۸	۱۵	۵۵۴۶	۲/۳۳۱	۰/۸۵۲

برای انجام تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی از نرم افزار Opensees (<http://opensees.berkeley.edu>) استفاده می‌شود. در همه مدل‌های سازه‌ای، غیرخطی هندسی و مصالح در نظر گرفته شده‌اند. غیرخطی مصالح به صورت صریح از طریق به کارگیری یک مدل‌سازی رشته‌ای لحاظ می‌شود.

## رکوردهای زلزله

برای حصول پاسخ‌های قابل اطمینان در تحلیل‌های تاریخچه زمانی، تعداد ۲۰ رکورد مختلف از ۱۳ زلزله متفاوت انتخاب شدند. این رکوردها از پایگاه داده مرکز تحقیقاتی PEER (<http://peer.berkeley.edu>) انتخاب شدند و دارای بزرگایی بزرگتر از ۵/۵ و فاصله از گسل بیشتر از ۱۲ کیلومتر می‌باشند. خاک محل از نوع خاک C آیین‌نامه NEHRP می‌باشد. برای اطمینان از اینکه سازه‌ها به خوبی وارد محدوده غیرارتجاعی می‌شوند، رکوردها به ۰/۷g مقیاس شده‌اند. مشخصات رکوردها به طور خلاصه در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

جدول ۲: مشخصات رکوردهای انتخاب شده

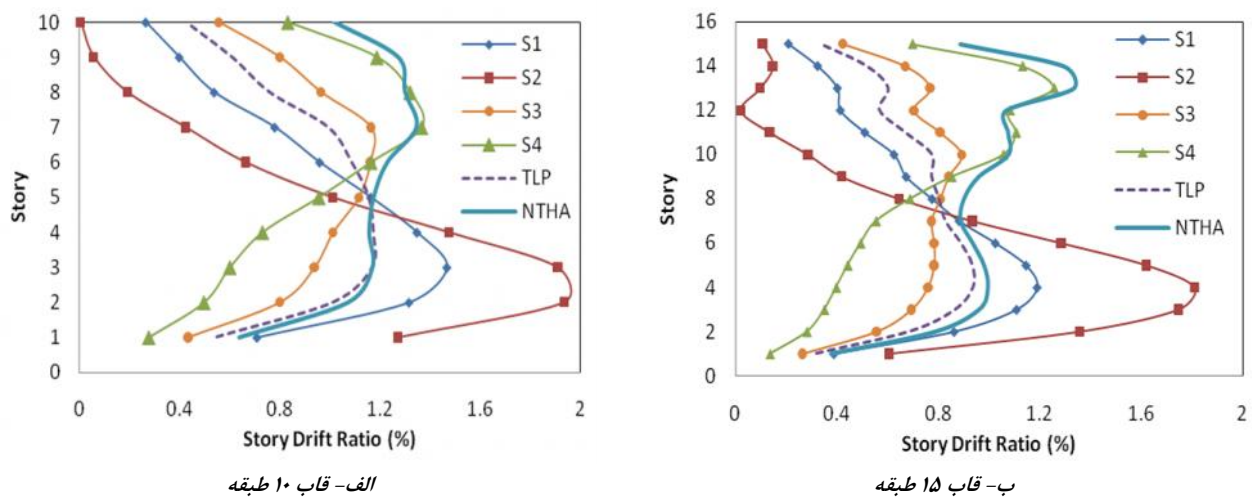
ردیف	زلزله	تاریخ	ایستگاه	بزرگا	مولفه	فاصله از گسل	PGA(g)
1	Duzce, Turkey	11/12/1999	Lamont 1061	7.1	E	15.60	0.13
2	Hollister	1/26/1986	SAGO South - surface	Ml(5.5)	295	-	0.09
3	Imperial Valley	10/15/1979	Parachute Test Site	6.5	315	14.20	0.20
4	Imperial Valley	10/15/1979	Cerro Prieto	6.5	147	26.50	0.17
5	Imperial Valley	10/15/1979	Superstition Mtn Camera	6.5	135	26.00	0.20
6	Kern County	7/21/1952	Taft Lincoln School	7.4	111	41.00	0.18
7	Livermore	1/24/1980	CSUH	5.8	146	31.00	0.07
8	Loma Prieta	10/18/1989	Anderson Dam	6.9	250	21.40	0.24
9	Loma Prieta	10/18/1989	Coyote Lake Dam	6.9	285	22.30	0.18
10	Loma Prieta	10/18/1989	Hayward- BART Sta	6.9	220	58.90	0.16
11	Morgan Hill	4/24/1984	Corralitos	6.2	310	22.7	0.109
12	N. Palm Springs	7/8/1986	Cranston Forest Station	6	315	35.30	0.17
13	Northridge	1/17/1994	Featherly Park	6.7	0	84.20	0.10
14	Northridge	1/17/1994	LA- Baldwin Hills	6.7	90	31.70	0.24
15	Northridge	1/17/1994	Inglewood-Union Oil	6.7	90	44.70	0.10
16	Northridge	1/17/1994	LA-Chalon Rd	6.7	70	23.70	0.23
17	San Fernando	2/9/1971	Palmdale Fire Station	6.6	210	25.40	0.15
18	Trinidad, California	11/8/1980	Rio Dell Overpass FF	Ms(7.2)	270	-	0.15
19	Victoria, Mexico	6/9/1980	Cerro Prieto	Ms(6.4)	45	-	0.62
20	Westmorland	4/26/1981	Parachute Test Site	5.8	225	-	0.24

## بحث بر روی نتایج

همان‌طور که گفته شد، تحلیل‌های پوش‌اور چند مودی تک اجرایی با استفاده از الگوهای بارگذاری ارتقا یافته که پیش از این معرفی شدند، انجام می‌شوند. این الگوهای بارگذاری که از ترکیب نیروهای جانبی مودی حاصل از روابط (۱۴)، (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) بدست آمده‌اند، به

ترتیب  $S_1$ ،  $S_2$ ،  $S_3$  و  $S_4$  نام گذاری می‌شوند. برای ارزیابی میزان موفقیت این الگوهای بارگذاری در تخمین نیازهای لرزه‌ای، پاسخ‌های لرزه‌ای حاصل از تحلیل‌های پوش‌اور با میانگین پاسخ‌های تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی مقایسه می‌شوند. علاوه بر این، یک تحلیل پوش‌اور با استفاده از الگوی بارگذاری مثلثی وارون نیز برای هر قاب انجام می‌شود.

مقادیر تغییرمکان نسبی<sup>۴</sup> طبقات حاصل از روش‌های مختلف تحلیل برای قاب‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج تحلیل پوش‌اور با الگوی بارگذاری  $S_1$  در طبقات پایین محافظه کارانه می‌باشد. در حالیکه این مقادیر در طبقات بالا بسیار کمتر از مقادیر واقعی تخمین زده شده‌اند. استفاده از شبه شتاب طیفی در رابطه نیروهای جانبی مودی و به کارگیری الگوی بارگذاری  $S_2$  در تحلیل پوش‌اور منجر به پاسخ‌های با دقت بسیار پایین‌تری می‌گردد. با جایگزینی نسبت مشارکت جرم موثر مودی در رابطه نیروهای جانبی مودی و استفاده از الگوی بارگذاری  $S_3$ ، نتایج در همه طبقات کمتر از مقادیر واقعی تخمین زده می‌شوند. با این وجود، پاسخ‌های لرزه‌ای در طبقات بالا در مقایسه با الگوهای  $S_1$  و  $S_2$  به نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی نزدیک‌تر می‌شوند. به عبارت دیگر، استفاده از نسبت مشارکت جرم موثر مودی به جای ضریب مشارکت مودی در رابطه نیروهای جانبی مودی سبب می‌شود که اثر مودهای بالا در تخمین نیازهای - لرزه‌ای در طبقات بالا در نظر گرفته شود و پاسخ‌ها بهبود یابند. هنگامی که علاوه بر نسبت مشارکت جرم موثر مودی، شبه شتاب طیفی نیز به عنوان یک متغیر وزنی در محاسبه نیروهای جانبی مودی به کار گرفته شود و از الگوی بارگذاری  $S_4$  در تحلیل پوش‌اور استفاده شود، تغییرمکان نسبی در طبقات بالا با دقت بالایی تخمین زده می‌شود. این امر در طبقات هفتم تا دهم ساختمان ۱۰ طبقه و طبقات دهم تا پانزدهم ساختمان ۱۵ طبقه در شکل ۲ به خوبی مشهود است.



شکل ۲: توزیع تغییرمکان نسبی طبقات در ارتفاع سازه

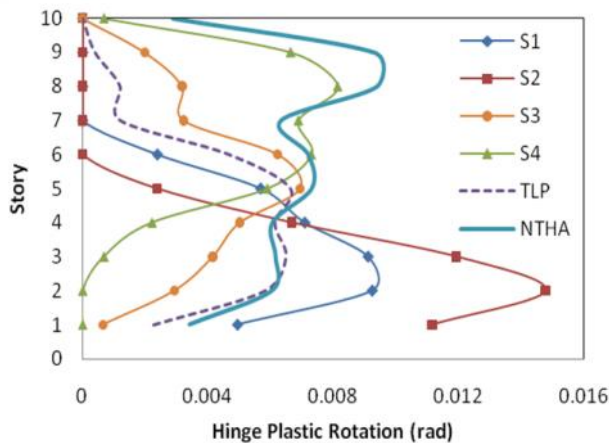
توزیع دوران پلاستیک مفاصل برای تیر دهانه میانی در ارتفاع قاب‌ها در شکل ۳ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوهای بارگذاری  $S_1$  و  $S_2$  نمی‌توانند تخمین مناسبی از دوران پلاستیک مفاصل در طبقات بالا ارائه دهند. بنابراین، این الگوهای بارگذاری ارتقا یافته نمی‌توانند اثر مودهای بالا در تخمین نیازهای لرزه‌ای را در نظر گیرند. این در حالی است که الگوی بارگذاری  $S_3$  که در آن بجای ضریب مشارکت مودی از نسبت مشارکت جرم موثر مودی استفاده شده است، در تخمین دوران پلاستیک مفاصل در طبقات بالا در مقایسه با دو الگوی  $S_1$  و  $S_2$  دقیق‌تر می‌باشد. با وجود این، بیشترین مشابهت با نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی در طبقات بالا مربوط به الگوی بارگذاری  $S_4$  می‌باشد که نشان دهنده موفقیت این الگو در لحاظ کردن اثر مودهای بالا در تخمین نیازهای لرزه‌ای می‌باشد. از آنجا که مجموع نسبت‌های مشارکت جرم موثر مودی برای همه مودها برابر واحد است، این نسبت بهتر می‌تواند مشارکت هر مود در توزیع نیروی جانبی را در الگوی بارگذاری  $S_4$  نشان دهد. در این الگوی بارگذاری، اثر مودهای بالا و اثر محتوای فرکانسی یک طیف مشخص زلزله به طور همزمان در نظر گرفته می‌شوند.

شکل‌های ۲ و ۳ موید این مطلب می‌باشند که تحلیل‌های پوش‌اور متداول قادر به تخمین پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان‌های بلند در طبقات بالا نمی‌باشند. با این حال همان‌طور که مشاهده می‌گردد، این تحلیل‌ها می‌توانند نیازهای لرزه‌ای در طبقات پایین را با دقت کافی پیش‌بینی کنند. دقت این روش‌ها در تخمین نیازهای سازه در طبقات پایین و توانایی الگوی بارگذاری  $S_4$  در محاسبه پاسخ‌ها در طبقات بالا، استفاده از پوش نتایج حاصل از انجام دو تحلیل پوش‌اور با الگوهای بارگذاری مثلثی وارون و  $S_4$  را به عنوان نیازهای لرزه‌ای سازه پیشنهاد می‌کند.

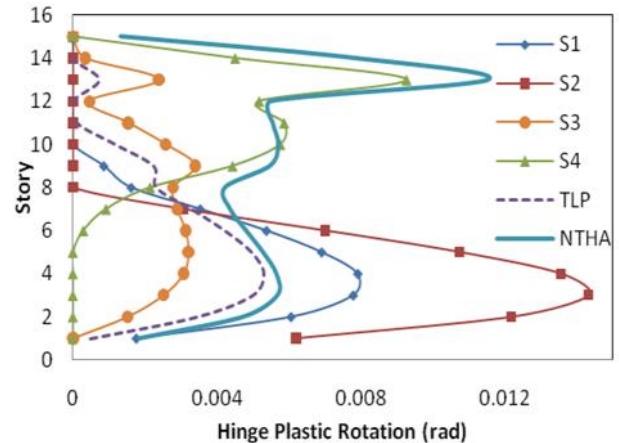
<sup>4</sup> Drift







الف- قاب ۱۰ طبقه



ب- قاب ۱۵ طبقه

شکل ۳: توزیع دوران پلاستیک مفاصل تیر دهانه میانی در ارتفاع سازه

## نتیجه گیری

تحلیل‌های پوش‌اور متداول نمی‌توانند اثر مودهای بالا را در تخمین نیازهای لرزه‌ای ساختمان‌های بلند در نظر گیرند. برای رفع این محدودیت، در این مقاله تلاش می‌شود تا اثر مودهای ارتعاشی بالا در یک توزیع نیروی جانبی ثابت متمرکز گردد. در این روش، انجام فقط یک تحلیل پوش‌اور کافی خواهد بود و نیازی به استفاده از قواعد ترکیب مودی برای ترکیب پاسخ‌ها نمی‌باشد. بدین منظور، چهار الگوی بارگذاری مختلف در تحلیل‌های پوش‌اور ارزیابی شدند. این الگوهای بارگذاری ارتقا یافته از جمع جبری نیروهای جانبی مودی در دو مود اول حاصل می‌شوند. برای یافتن مناسب‌ترین الگوی بارگذاری، اثر متغیرهای مختلفی چون ضریب مشارکت مودی، نسبت مشارکت جرم موثر مودی و شبه شتاب طیفی زلزله در الگوهای بارگذاری ارتقا یافته بررسی می‌گردد. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که کارگیری همزمان نسبت مشارکت جرم موثر مودی و شبه شتاب طیفی زلزله در الگوی بارگذاری ارتقا یافته منجر به تخمین دقیق نیازهای لرزه‌ای در طبقات بالای ساختمان می‌شود. با این وجود، در طبقات پایین دقت تحلیل‌های پوش‌اور با توزیع بار مثلثی وارون بیشتر است. بنابراین، استفاده از پوش‌نتایج حاصل از تحلیل‌های پوش‌اور با الگوی بارگذاری مثلثی و الگوی بارگذاری ارتقا یافته S<sub>4</sub> توصیه می‌شود.

## مراجع

- Antoniou S and Pinho R (2004a) Advantages and limitations of adaptive and non-adaptive force-based pushover procedures. *J Earthq Eng* 8(4):497-522
- Antonio S and Pinho R (2004b) Development and verification of a displacement-based adaptive pushover procedure. *J Earthq Eng* 8(5):643-61.
- ATC (1996) Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Report ATC-40. Redwood City (CA): Applied Technology Council
- CEN. Pr-EN 1998-1 (2003) Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance, Part 1: Final Draft. Brussels (BEL): European Committee for Standardization
- Chopra AK and Goel RK (2002) A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthq Eng Struct Dyn* 31:561-82
- Chopra AK and Goel RK (2005) Role of higher-mode pushover analyses in seismic analysis of buildings. *Earthq Spectra* 21(4):1027-41
- Chopra AK, Goel RK and Chintanapakdee C (2004) Evaluation of a modified MPA procedure assuming higher modes as elastic to estimate seismic demands. *Earthq Spectra* 20(3):757-78
- Chopra AK (2001) *Dynamics of structures. Theory and applications to earthquake engineering*, 2nd ed. Englewood Cliffs (NJ): Prentice Hall



- FEMA (2000) Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA 356, Washington (DC), Federal Emergency Management Agency
- Gupta B and Kunnath SK (2000) Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures. *Earthq Spectra* 16(2):367–91
- Jan TS, Liu MW and Kao YC (2004) An upper-bound pushover analysis procedure for estimating the seismic demands of high-rise buildings. *Eng Struct* 26: 117\_28
- Kalkan E and Kunnath SK (2006) Adaptive modal combination procedure for nonlinear static analysis of building structures. *J Struct Eng*, ASCE 132(11):1721–31
- Kim S-P and Kurama YC (2008) An alternative pushover analysis procedure to estimate seismic displacement demands. *Eng Struct* 30:3793–3807
- Krawinkler H and Seneviratna GDPK (1998) Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation. *Eng Struct* 20(4-6):452-62
- Kreslin M and Fajfar P (2011) The extended N2 method taking into account higher mode effects in elevation. *Earthquake Eng Struct Dynam* <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.1104>
- Kunnath SK (2004) Identification of modal combination for nonlinear static analysis of building structures. *Comput-Aided Civ Eng* 19:246–59
- Matsumori T, Otani S, Shiohara H and Kabeyasawa T (1999) Earthquake member deformation demands in reinforced concrete frame structures. In: *Proceeding of the US–Japan workshop on performance-based earthquake engineering methodology for RC building structure*
- OpenSees: Open system for earthquake engineering simulation (2013) Berkeley (CA): Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California <<http://opensees.berkeley.edu/>>
- Panyakapo P (2014) Cyclic pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings. *Eng Struct* 66:10–23
- Poursha M, Khoshnoudian F and Moghadam AS (2010) Assessment of modal pushover analysis and conventional nonlinear static procedure with load distributions of Federal Emergency Management Agency for high-rise buildings. *J Struct Des Tall Spec Build* 19(3):291-308
- Poursha M, Khoshnoudian F and Moghadam AS (2009) A consecutive modal pushover procedure for estimating the seismic demands of tall buildings. *Eng Struct* 31:591–9
- Standard No. 2800-05. Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings (2005) 3rd ed. Building and Housing Research Centre, Iran
- Sucuoglu H and Selim Gunay M (2011) Generalized force vectors for multi-mode pushover analysis. *Earthquake Eng Struct Dynam* 40:55-74